

定向钻进技术及其应用

向军文^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所特钻中心, 河北 廊坊 065000)

摘要: 论述了定向钻进技术的应用范围, 螺杆钻具的结构及其工作原理、配套器具的性能和选择、定向井的设计、工艺参数的确定, 重点介绍了定向钻进工艺技术。

关键词: 定向钻进; 螺杆钻具; 钻头; 造斜率

中图分类号: P634.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2007)09-0028-05

Technology of Directional Drilling and the Application/XIANG Jun-wen^{1,2} (1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: The author introduces the application field of directional drilling technology, structure of downhole motor and operational principle, performance and choice of accessories, design of directional well and determination of processing parameters, specially emphasized directional drilling technology.

Key words: directional drilling; downhole motor; bit; deflection rate

定向钻进技术近年来发展迅速, 已广泛应用到矿产勘探、矿产开采及煤层气开发上。为此, 有必要就螺杆钻定向钻进技术及工艺进行研究, 确保定向钻进技术的发展。

1 定向钻进定义

定向钻进是利用钻孔自然弯曲规律及人工造斜工具使钻孔按设计要求钻进到预定目标的一种钻探方法。

2 定向钻进技术的应用范围

2.1 勘探孔纠偏

2.2 石油天然气领域

- (1) 海洋钻井平台钻丛式定向井;
- (2) 因受地表陡山、滨海、森林、建筑物及农田等限制而实施定向井;
- (3) 侧钻绕过事故井;
- (4) 处理井喷或失火定向井;
- (5) 在油气层中钻定向长水平井提高开采量。

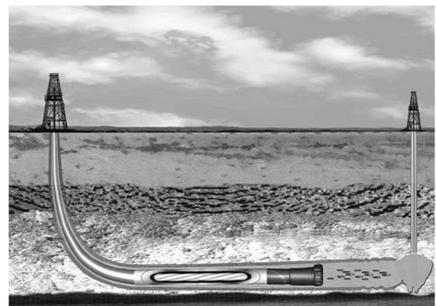
2.3 其它应用领域

- (1) 地热井: 钻多孔底定向井多次穿过含水层或沿含水层长水平定向钻进, 提高出水量;
- (2) 开发地壳深部“干热岩”: 实施两井定向连通后, 一井注冷水, 一井可产出高温蒸气发电;
- (3) 矿山工程中的铅直孔: 精确定向;

- (4) 煤层气定向连通开采;
 - (5) 煤炭地下气化定向施工;
 - (6) 硫的热溶开采和铀、铜的钻孔溶浸开采, 以及铁、磷、石英砂矿等的钻孔水力开采;
 - (7) 环保领域等。
- 其施工示意图见图 1。



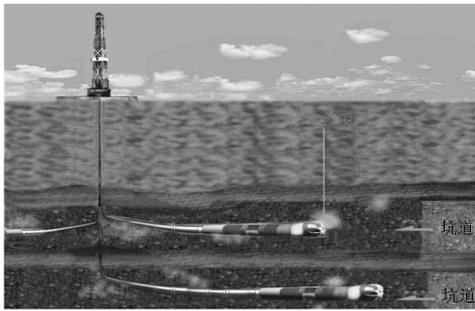
(a) 水平段分支采矿



(b) 可溶性矿产开采对接井工程

收稿日期: 2007-08-01

作者简介: 向军文(1967-), 男(汉族), 湖北人, 中国地质大学(北京)博士研究生在读, 中国地质科学院勘探技术研究所特钻中心主任、教授级高级工程师, 地质工程专业, 从事定向钻进技术研究及开发工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, (0316)2096010。



(c) 煤层气及瓦斯排放孔
图 1 定向钻进施工示意图

3 螺杆钻定向钻进技术

3.1 螺杆钻定向钻进的优点

- (1) 钻杆可以不转动——这样可以减少钻杆的疲劳和磨损,从而减少钻杆折断事故;
- (2) 钻杆不转动——既降低了钻杆与套管或井壁的磨损,也防止因钻杆旋转摩擦井壁而造成井径扩大、坍塌掉块及卡钻等井内事故;
- (3) 与高精度定向仪器配合,可精确控制钻孔轨迹,可实现随钻定向或遥控钻进;
- (4) 对地层适应广——既可用于硬、坚硬的完整地层,又可用于破碎地层、第四系地层、松软及中硬、软硬不均地层造斜;
- (5) 可以适应中、长、短轴率半径的定向孔或各种特种工程。

3.2 螺杆钻定向钻进配套机具

有线随钻定向配套如图 2 所示,无线随钻则不采用电缆和测井绞车及通缆水龙头。

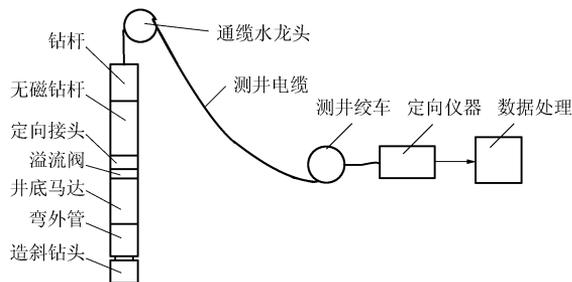


图 2 有线随钻定向示意图

3.3 螺杆钻具工作原理

- (1) 螺杆钻具为一种正排量容积式液压马达;
- (2) 转子与定子通常处于接触状态,并形成由若干连续的密封线所划分的若干个封闭腔;
- (3) 泥浆泵泵出的钻井液流经旁通阀进入马达,在马达的进、出口形成一定的压力差,推动马达的转子旋转,并将扭矩和转速通过万向轴和传动轴

传递给钻头。

3.4 螺杆钻具结构

螺杆钻具主要由旁通阀、马达、万向轴和传动轴等 4 个部分组成。

3.4.1 旁通阀(或称溢流阀)

有 2 个位置:旁通位和关闭位。在起下钻作业过程中它处于旁通位。阀体侧面的旁通孔将环空和钻柱内孔沟通,使起下钻时泥浆不溢于井台上。当泥浆流过阀心孔时,孔的两端产生压力差,压力差所产生的推力达到克服弹簧力和静摩擦力时,阀心被压下,旁通孔关闭。此时泥浆流经马达,把压力能转换为机械能。泥浆泵停泵或流量值过小,所产生的压力差不足以克服弹簧力和静摩擦力时,弹簧把阀心顶起,旁通阀又处于开位。

3.4.2 螺杆马达

泥浆泵泵出的钻井液流经旁通阀进入马达,在马达的进、出口形成一定的压力差,推动马达的转子旋转,并将扭矩和转速通过万向轴和传动轴传递给钻头。

3.4.3 万向轴

上接转子、下连传动轴导流水帽,它的作用是把转子的行星运动转化为传动轴的定轴转动,将马达的扭矩及转速传给传动轴以至钻头。万向轴上有 2 个活节。

3.4.4 传动轴

负责将马达的扭矩和转速传给钻头,同时要能承受钻进时所产生的轴向力和径向力。上下轴承是推力球轴承,径向轴承为硬质合金轴承。

3.5 螺杆钻具的不同造斜特性

螺杆钻具造斜主要靠螺杆钻具上的弯接头或弯外管,根据不同厂家的钻具结构及井身结构,基本的造斜钻具的造斜率见表 1、2。

表 1 厂家一不同弯接头造斜率表 /[(°)·m⁻¹]

弯外管角度/(°)	Ø73 mm 螺杆钻具, Ø95 mm 井眼
1	0.1 ~ 0.2
1.5	0.2 ~ 0.3
2	0.3 ~ 0.4
2.5	0.4 ~ 0.5

表 2 厂家二不同弯接头造斜率表 /[(°)·m⁻¹]

弯外管角度/(°)	Ø73 mm 螺杆钻具, Ø95 mm 井眼
0.75	0.2 ~ 0.3
1	0.3 ~ 0.45
1.5	0.45 ~ 0.6
2	0.6 ~ 0.8

4 无磁钻杆的选择

地球磁场是一个矢量场,由于地磁场的作用,钻井过程中,钻具被磁化,对磁性罗盘产生磁干扰。并且地球纬度的不同,产生的地磁场强度也不同,罗盘受干扰的强弱就不同。另外,井眼倾斜角和方位角也与磁源干扰有关。如果不采取相应有效措施,会直接影响仪器的测量精度。

为了将磁力影响降到最低程度,应对无磁钻铤的长度有一定的要求,并使用无磁加长杆来调整罗盘在无磁钻铤中的位置,使罗盘最有效地远离上部钻杆和下部钻头的磁力干扰。

图 3 是国际磁场强度图,从图中可以看出,全球根据磁场强度不同,分了 3 个区域,我国大部分地区处在区 1 范围。

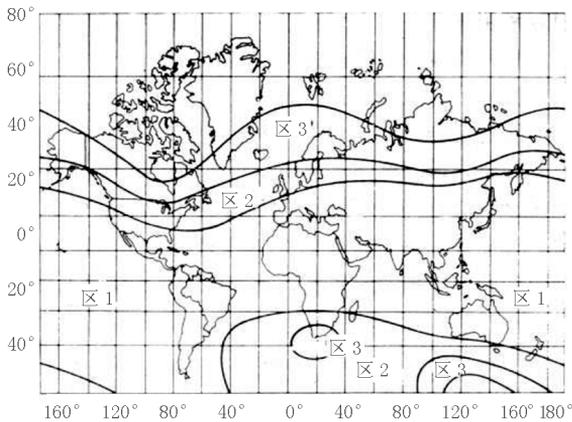
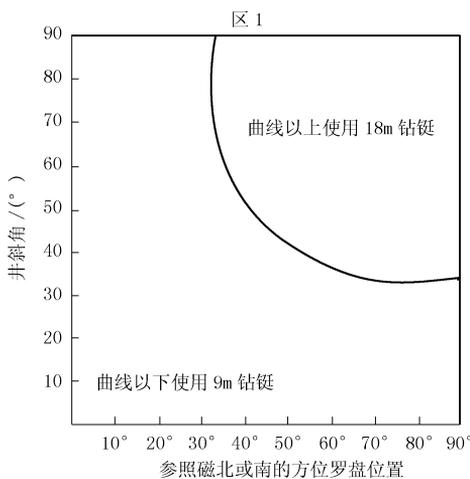


图 3 不同地区的磁场强度图

根据地磁场强度分区,利用井眼的倾斜角和方位角的关系曲线图(见图 4),可以确定无磁钻铤的长度和罗盘所处的最佳位置。



9m 钻铤: 中心以下 0.9 ~ 1.2m; 18m 钻铤: 中心以下 2.4 ~ 3.0m

图 4 井斜角和方位角的关系曲线图

5 定向仪器

20 世纪末,受成本控制和国内市场供应影响,用于定向对接井的仪器大多为国产有线随钻测斜仪和单多点测斜仪,也有使用国外进口测井仪器的。进入 21 世纪,世界能源出现紧张局面,石油行业发展极快,促进了石油钻井测量/测井技术的发展。

5.1 国内定向仪器现状

国内厂商主要以航天系统为基础在 20 世纪 90 年代相继开发了有缆测井仪器,如北京普利门机电高新技术公司开发的 DST 有线随钻测斜仪、北京海蓝科技开发有限责任公司开发的 YST 有线随钻测斜仪等。有线随钻仪测斜得到迅猛发展,有 10 余家产品可供选用,但各家产品技术水平参差不齐。2005 年后至今,已有厂家成功研制出无线随钻系统,目前已基本达到应用阶段。

5.2 国内主要定向仪器性能(见表 3)

技术指标	有线测井仪	无线泥浆脉冲系统	备注
顶角范围/(°)	0 ~ 90	0 ~ 90	
顶角精度/(°)	±0.1	±0.1	2005 年以后
方位角范围/(°)	0 ~ 360	0 ~ 360	
方位角精度/(°)	±1.5	±1.0	2005 年以后
工具面角范围/(°)	0 ~ 360	0 ~ 360	
工具面角精度/(°)	±1.5	±1.0	2005 年以后

5.3 国外主要定向仪器性能(见表 4)

系统公司(年)	测量误差(角度测量范围)/(°)			井内仪器直径/mm
	顶角 α	方位角 φ	工具角 θ	
Auuu Trac Eastman Cristensen(美国,1987)	0.2 (10 ~ 90)	2.0 (0 ~ 360)	1.0 (0 ~ 360)	171、197、 203、229、241
MPT Sperrysun (英国,1987)	0.1 (0 ~ 90)	0.25 (0 ~ 360)	0.75 (0 ~ 360)	71、203
Adrisor Schumberger Anadrill(美国,1987)	0.15 (0 ~ 90)	0.6 (0 ~ 360)	0.6 (0 ~ 360)	159、178、 203、229
Sonat Teleco (美国,1990)	0.25 (0 ~ 90)	1.5 (0 ~ 360)	3.0 (0 ~ 360)	171、197、 210、241

6 造斜钻头

- (1) 具有中心锥形线——唇面近似平面,使钻头便于偏斜;
- (2) 钻头的外侧刃短——外侧刃不仅要保径,还要造斜;
- (3) 因岩心有导向作用,造斜钻头不取心;
- (4) 造斜钻头要避开中心死点;
- (5) 因不取心,岩屑多,钻头底部过水断面要大,水眼和水槽要宽且深,有利于排屑和冷却钻头;
- (6) 根据不同类型地层——硬质合金、金刚石、

牙轮。

7 定向井的设计

目前定向井的设计主要采用直—弯—水平二维井身结构设计(见图 5)。

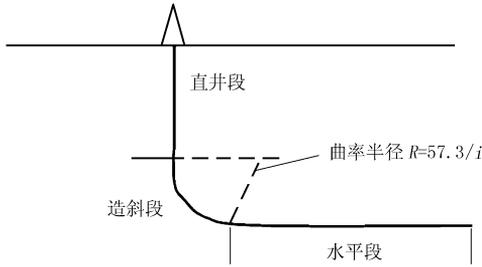


图 5 定向井井身结构示意图

8 造斜率选择

大——钻具弯曲严重,易产生键槽,管材下入困难,泥浆要求高;但可快速由直变水平。

小——造斜工作量大,水平位移大。

一般连续造斜钻进,造斜率选 $0.35 \sim 0.45^\circ/\text{m}$; 后续需要回转钻进,造斜率选 $0.25 \sim 0.35^\circ/\text{m}$ 。

9 定向钻进工艺参数确定

仪器工具面角:仪器角差 + 反扭转角 + 造斜安装角 + 钻具装合差。

9.1 仪器工具角的确定

以仪器的“狗腿”开口朝上,测斜定向仪器所显示的工具角为测斜仪器的角差。处理方式:

- (1)后面计算工具角时,直接将此值参与计算;
- (2)利用仪器设置,将此时定为仪器的零点值。

9.2 反扭转角的确定

根据不同螺杆钻具的工作性能及井底工作情况,一般取反扭角 $15^\circ \sim 45^\circ$ 。

9.3 螺杆钻具装合差

自钻头向上看(见图 6),以螺杆钻具弯外管(或弯接头)母线为中线,定向接头母线在左手边,则螺杆钻具装合差为正值;如在右手边,则钻具装合差为负值。装合差值 = $360L / (3.14 \times \text{定向接头直径})$ 。

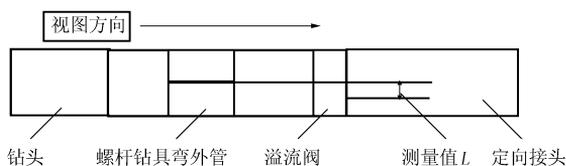


图 6 确定螺杆钻具装合差示意图

9.4 定向安装角计算

$$\cos\gamma = \cos\theta_1 \cos\theta_2 + \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\Delta\alpha$$

$$\text{ctg}\beta = (\cos\theta_1 \cos\Delta\alpha - \sin\theta_1 \text{ctg}\theta_2) / \sin\Delta\alpha$$

式中: γ ——全弯曲角, $\gamma = i\Delta L$; i ——造斜率; ΔL ——孔长; θ_1 ——初始顶角; θ_2 ——下点顶角; $\Delta\alpha$ ——方位增量; β ——计算安装角。

9.5 定向安装角几何作图法(见图 7)及校验计算工具面角方法(见图 8)

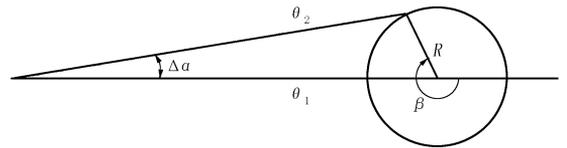


图 7 现场几何作图法

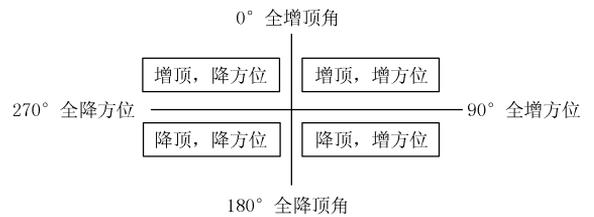


图 8 计算安装角与顶角、方位角关系

9.6 定向钻进轨迹计算

计算方法很多,现场施工主要采用均角全距法:

$$X = \Delta L \sin[(\theta_1 + \theta_2)/2] \cos[(\alpha_1 + \alpha_2)/2]$$

$$Y = \Delta L \sin[(\theta_1 + \theta_2)/2] \sin[(\alpha_1 + \alpha_2)/2]$$

$$Z = \Delta L \cos[(\theta_1 + \theta_2)/2]$$

10 定向钻进工艺技术

10.1 下钻前准备技术措施

(1)认真检查弯壳体的度数和定向键的方向是否与弯曲方向一致,并计算钻具的装合差。

(2)详细检查所下钻具并符合设计要求。

(3)根据动力钻具的转速、钻遇地层和井深选择合适的钻头,防止因钻头选型不合适引起钻头事故。

(4)安装钻头时,应采用钻头装卸器,避免人为损坏钻头切削齿。

(5)动力钻具必须在井口接方钻杆试运转,运转正常后方可下入井内。

(5)定向井的井下转矩及摩擦大,要尽量简化下部钻具组合,采用加重钻杆代替钻铤加压,减少钻具粘卡的几率。

10.2 起、下钻操作注意事项

(1)钻具要双钳紧扣并控制下放速度。

(2)下动力钻具遇阻时,不得用动力钻具划眼,不能开泵硬压,可转动几个方向试下,否则起钻通

井。

(3) 定向前的直井段钻完后, 必须充分循环并调整好钻井液性能后方可起钻下入定向造斜钻具。

(4) 定向造斜后, 应以开泵冲及循环为主, 尽量不用转盘划眼。

(5) 在裸眼井段要控制起、下钻速度, 防止在速率较大井段拉出键槽而导致键槽卡钻。

(6) 起钻遇阻时, 上提下放活动钻具使其逐渐脱离遇卡井段, 不可硬提。

10.3 钻进技术措施

(1) 启动螺杆钻具时, 如果钻具处于井底, 必须提起 0.3~0.6 m, 开泵时记下压力表读数, 并与计算的压力值进行比较, 如果略有超值也属正常, 这是钻头侧钻引起的。

(2) 钻进时严格按照要求加压, 使用螺杆钻具钻进时, 钻进参数要和设计推荐值基本一致。螺杆钻具下入井底逐步加压, 马达扭矩增加, 泵压升高, 这个升高的压力值应符合所使用型号螺杆钻具规定的马达压降值, 此压力表增大的数值反映了马达的负载是否正常, 也反映钻压加得是否合适, 因此保持钻压基本稳定, 把泵压限制在所用钻具推荐范围内。

(3) 钻进过程中, 如果循环压力明显低于计算值, 可能是旁通阀处于开位或钻杆损坏、井漏等造成的。如果循环压力高于计算值, 而且侧钻造成压力升高的因素已排除, 循环压力仍高于计算值, 则可能是钻头水眼堵或传动轴被卡死, 此时循环压力要比计算压力高得多, 如地表无法排除故障时, 要立即起钻。

(4) 接单根时不得用转盘卸扣, 不得任意转动转盘, 必须用双钳紧扣。

(5) 定向井钻具组合和钻进参数要以设计为准。如需变动, 必须由现场技术负责人员提出书面的技术措施申请, 经批准后执行。

(6) 定向钻进中, 因各种原因停钻时, 为防止卡钻, 应以大幅度上下活动钻具为主, 严禁用转盘循环, 造成台阶。及时活动钻具, 接单根要迅速, 防止钻具粘卡。

10.4 定向操作与定向控制技术措施

(1) 定向仪器坐键后, 不要回摇绞车, 防止仪器出键。

(2) 定向转动钻具时, 钻头应离开井底一定距离(3~10 m), 防止井底沉砂或缩径致使转动钻具时地面与井下不同步而造成人为误差。

(3) 定向转动钻具角度大时, 要分段转动, 每转

动一段都要上下大幅度活动钻具, 使储存在下部钻柱上的弹性扭转变形能释放。

(4) 启动井下螺杆钻具钻进时, 要注意因补心晃动而使方钻杆多倒转的角度并及时修正。

(5) 随钻定向过程中应及时测量井斜角和方位角, 并根据数据处理及时作出水平投影图和垂直剖面图, 以掌握轨迹, 制定下一步措施。

(6) 钻水平段时, 应严密监测井眼轨迹变化, 保证不出靶区。

(7) 定向造斜后, 尽量缩短停留时间, 做到连续施工, 以免下钻遇阻划眼。

(8) 进行单点测斜时, 注意活动钻具防卡, 钻具静止时间间隔 ≥ 3 min。并控制好测斜仪的起下速度, 同时要注意钢丝的记号。

(9) 在井斜超过 45° 的大斜度井段测斜定向时, 仪器在钻具内下行困难, 可利用泵送的方式将仪器推送到位。

(10) 在井斜与方位角变化大的井段易产生键槽, 在施工过程中要严格控制井眼的全角变化率 in 要求范围内。产生键槽后, 要及时采取措施破坏键槽。

(11) 在更换钻具下钻时, 防出新眼是重中之重, 在定向钻进后, 必须对定向段进行认真扩划眼, 扩眼时钻压 ≥ 20 kN。每次下钻至上一只钻头所钻进的井段, 要减慢下放速度, 有遇阻显示立即扩划眼。在扩划眼过程中, 应注意活动钻具, 防止粘卡事故发生。

(12) 定向钻进井段每 3 m 左右要扩划眼一次, 每 50~60 m 要短起下一次, 特别在井斜 $45^\circ \sim 65^\circ$ 井段, 必须多起下几次, 及时活动钻具, 防止岩屑沉积卡钻。采用短起下钻和分段循环钻井液的方法清除岩屑床。接单根前必须认真划眼, 停泵无阻卡后方可接单根。并做到早开泵、晚停泵, 减少岩屑下沉, 遇阻、遇卡不能硬压硬拔, 应开泵循环, 活动钻具冲通。

(13) 如增斜或稳斜井段井下情况复杂要划眼时, 必须使用钻该井段的原始钻具组合进行通井或划眼。

(14) 每只定向钻头起钻后, 要进行扩眼和对定向点进行修整。

(15) 在斜井段进行设备检修时, 不要长时间将钻具停在一处循环, 以免井眼出现台阶。

且随同取心外管旋转,实现双管单动,有利于岩心进入并保持岩心完好。

4.3 既能造斜钻进又能绳索取心

该钻具最大的创新点是既能定向钻进,又能绳索取心。而且还能随时测量钻进时的顶角、方位及工具面角(见图6)。

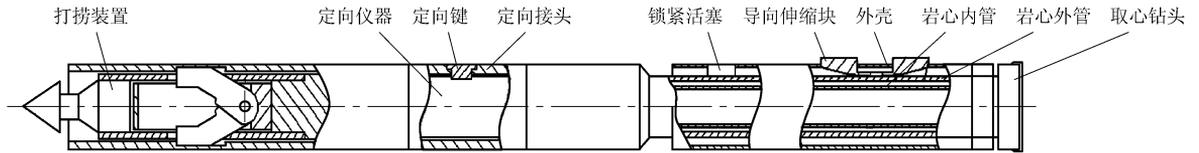


图6 定向钻进绳索取心钻具结构图

5 技术性能

所研制的定向钻进连续取心钻具主要技术参数:定向造斜孔径 76 mm,定向钻进取心直径 30 ~ 33 mm,水平钻进取心直径 45 ~ 55 mm,定向造斜孔段的“狗腿”度 $0.1^{\circ} \sim 0.4^{\circ}/m$,适用定向造斜孔的孔斜范围 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。

6 应用实例

(1)新加坡九龙岛海底储油库选址勘察(见图7)。单孔定向钻进取心深度达 500 m,其中水平段 300 m;共 6 孔,钻进总工作量 2400 m,全程取心。



图7 新加坡应用定向钻进取心技术进行储油库选址地质调查

(2)挪威某海底应用定向钻进取心技术进行隧道选址地质调查(见图8)。

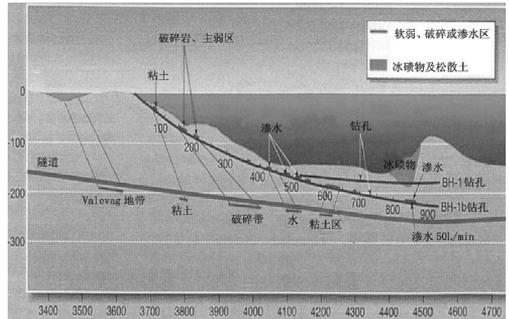


图8 挪威某海底应用定向钻进取心技术进行隧道选址地质调查

7 结语

(1)造斜及水平钻进过程中的连续取心技术属于定向钻进领域中的前沿技术,它结合了钻探、测井和自动化专业尖端技术,代表了钻探界较高的技术水平。

(2)随着国民经济的发展,该项技术将越来越广泛地应用于地质勘探、石油及煤层气开采、国防建设等工程领域。

(3)该项技术目前仅由国际上一二家公司所掌握,我国在这方面的研究尚处于起步阶段,应加强力量组织攻关。

(上接第 32 页)

(16)在定向造斜钻进过程中,如果出现泵压突然升高或降低的异常现象,应立即停泵,在技术人员未到场分析查找问题以前,不得上提活动钻具。

(17)造斜过程中钻具总长校正误差 $\geq 1\%$ 。

10.5 钻井液性能要求

(1)确保泥浆性能良好,具有较强的携带能力和悬浮能力,钻进过程中注意观察岩屑返出的情况,

如有异常,及时调整钻井液携岩粉能力和排量。

(2)定向井钻井液的含砂量要求全井控制在 0.5% 以下。定向井要严格控制钻井液的失水量和泥皮厚度:滤失量 $< 5 \text{ mL}/30 \text{ min}$,泥皮厚度 $\geq 0.5 \text{ mm}$ 。

(3)针对容易吸钻的泥岩地层,进入造斜段之后,泥浆中的原油混入一般不能低于 10%。